Article

2008년 하계 울릉분지에서 관측된 물리·화학적 외압에 대한
플랑크톤 군집의 반응

노태근¹ · 김윤배² · 박정인³ · 이용우¹ · 임동훈³ · 강동진^{4*} · 이동섭¹ · 윤승태⁵ · 김태훈⁵ ·
곽정현² · 박현제² · 정만기³ · 장경일⁵ · 강창근² · 서해립³ · 박명원⁶ · 이호정⁶ · 김경렬⁵

¹부산대학교 해양연구소/해양시스템과학과
(609-735) 부산시 금정구 장전동 산30

²포항공과대학교 해양대학원
(790-784) 경북 포항시 남구 효자동 산31

³전남대학교 지구환경과학부 해양환경전공
(500-757) 광주시 북구 용봉로 77

⁴한국해양연구원 기기 검 · 교정분석센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 사2동 1270

⁵서울대학교 지구환경과학부/해양연구소
(151-742) 서울시 관악구 관악로 599

⁶국립해양조사원
(400-800) 인천시 중구 서해로 195

Plankton Community Response to Physico-Chemical Forcing in the
Ulleung Basin, East Sea during Summer 2008

TaeKeun Rho¹, Yun-Bae Kim², Jeong In Park³, Yong-Woo Lee¹, Dong Hoon Im³,
Dong-Jin Kang^{4*}, Tongsup Lee¹, Seung-Tae Yoon⁵, Tae-Hoon Kim⁵, Jung-Hyun Kwak²,
Hyun Je Park², Man Ki Jeong³, Kyung-Il Chang⁵, Chang-Keun Kang²,
Hae-Lip Suh³, Myungwon Park⁶, Hojeong Lee⁶, and Kyung-Ryul Kim⁵

¹Marine Research Institute/Department of Oceanography
Pusan National University, Busan 609-725, Korea

²Ocean Science & Technology Institute
Pohang University of Science & Technology, Pohang 790-784, Korea

³Department of Oceanographic Environment
Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

⁴Marine Instrument Service & Calibration Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

⁵School of Earth & Environmental Sciences/Research Institute of Oceanography
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

⁶Korea Hydrographic & Oceanographic Administration
Incheon 400-800, Korea

*Corresponding author. E-mail : djocean@kordi.re.kr

Abstract : In Summer 2008, a multidisciplinary survey was conducted onboard R/V Haeyang 2000 to understand plankton response to the three distinct physico-chemical settings that developed in the Ulleung Basin of the East Sea. Baseline settings of hydrographic conditions included the presence of the thin (<20 m) Tsushima Surface Water (TSW) on top of the Tsushima Middle Water (TMW). It extends from the Korea Strait to 37°N along the 130°E and then turns offshore and encompasses the relatively saline ($T > 26^{\circ}\text{C}$, $S > 33.7$) Ulleung Warm Eddy surface water centered at 36.5°N and 131°E. A relatively colder and saline water mass appeared off the southeastern coast of Korea. It was accompanied by higher nutrient and chlorophyll-*a* concentrations, suggesting a coastal upwelling. Most of the offshore surface waters support low phytoplankton biomass ($0.3 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$). A much denser phytoplankton biomass ($1\text{--}2.3 \text{ mg m}^{-3}$) accumulated at the subsurface layer between 20-50 m depth. The subsurface chlorophyll-*a* maximum (SCM) layer was closely related to the nutricline, suggesting an active growth of phytoplankton at depth. The SCM developed at shallow depth (20-30 m) near the coast and deepened offshore (50-60 m). A fucoxanthin/zeaxanthin ratio was high in coastal waters while it was low in offshore waters, which indicated that diatoms dominate coastal waters while cyanobacteria dominate offshore waters. The community structure and biomass of phytoplankton are closely related to nitrogen availability. Zooplankton biomass was higher in the coastal region than in the offshore region while species richness showed an opposite trend. Zooplankton community structure retained a coastal/offshore contrast. These suggest that summer hydrography is a stable structure, lasting long enough to allow a hydrography-specific plankton community to evolve.

Key words : Plankton Community Structure, Coastal Upwelling, Physico-Chemical Forcing, Ulleung Basin, East Sea

1. 서 론

최근 전지구적인 규모로 진행되고 있는 지구온난화 현상으로 인해 전 대양은 수온 상승과 해수면 상승 등과 같은 물리환경특성의 변화를 겪고 있으며 이러한 표층해양의 물리적인 변화는 해양 생태계의 변화를 수반한다. 대양은 시·공간적 규모의 방대함과 이로 인한 관측의 부족으로 전지구적인 변화에 수반된 물리적 해양 환경 변화와 이로 인한 생태계 변화를 이해하는데 어려움이 있다. 그러나 동해는 비교적 작은 규모의 바다(폭과 넓이: 800 km와 1000 km 가량)이면서도 심층수 형성, 열염분 순환, 아극전선, 용승, 중소규모의 와류 등 대양에서 일어나는 물리환경 특성을 지니고 있고 그 순환이 대양에 비해 매우 빠르게 일어나고 있는 “작은 대양”으로 불리고 있다. 즉, 동해는 외압에 따른 해양의 물리·화학적 환경 변화와 이에 대한 해양 생태계의 반응을 관측하고 예측하기에 적합한 장소이다. 이러한 이유로 동해는 전지구적 변화에 대한 연구를 위한 자연 학습장으로 여겨지고 있다(Kim et al. 2001).

동해 해수의 물리적인 특성은 전 지구적인 규모로 일어나는 기후변동에 민감하게 반응하고 생태계의 구조와 생산성에 많은 영향을 미친다(Kim and Kang 2000; Kang et al. 2000; Chiba et al. 2005). 동해 남부해역과 북부해역의 플랑크톤 생체량의 변화는 Pacific Decadal Oscillation (PDO)와 같이 태평양 전체에서 일어난 기후체계돌변 (climate regime shift)과 동기화 되어 있음이 보고되었다(Chiba et al. 2005). 그리고 1980년대와 1990년대에 동해

의 주요 어종인 오징어, 멸치, 꽁치 등의 어획량의 급격한 변동은 동물플랑크톤의 군집구조와 생체량과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정되었다(Zhang et al. 2000; Kang et al. 2002).

동물플랑크톤 생체량은 표층혼합층 두께감소에 의한 봄철 식물플랑크톤의 생체량 증가와 관련이 있는 것으로 알려졌다(Kang et al. 2000), Chiba et al. (2005)에 의하면 동해 북부해역(일본분지)과 남부해역(울릉분지 및 야마토분지)에서 물리환경 변화와 플랑크톤의 반응이 상이한 것으로 보고하였다. 동해 북부해역에서는 봄철에 성층이 강하게 형성되어 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 생체량의 증가하지만 남부해역에서는 오히려 봄철에 성층이 강하게 형성되면 유광층으로 영양염 공급이 제한되어 식물플랑크톤 생산이 감소하는 것으로 나타났다.

최근 동해에서 수행된 연구에 의하면 동해의 동물플랑크톤의 군집구조와 분포특성은 극전선을 경계로 북부해역과 남부해역에서 뚜렷한 차이를 보이고 이는 물리환경의 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 특히 울릉분지 해역은 상이한 특성을 가진 북부와 남부의 플랑크톤 군집이 혼합되는 지역으로 물리환경의 변화가 플랑크톤의 군집 및 생체량 변화에 중요한 영향을 미치는 곳이다(Ashjian et al. 2005 and reference therein). 동해 북부해역에서는 춘계 식물플랑크톤 생체량과 동물플랑크톤 생체량이 밀접한 상관관계를 보인 반면 남부지방에서는 약한 상관관계가 나타났다(Chiba et al. 2005). 이는 동물플랑크톤 생체량 변화를 이해하기 위해서 춘계 식물플랑크톤의 생체량 뿐만 아니라 물리환경 특성과 같은 다른 요

인에 의한 영향도 고려되어야 함을 시사한다(Ashjian et al. 2005; Yebra et al. 2009).

울릉분지에서 하위영양단계인 영양염, 식물플랑크톤 종 조성 및 생산량 등에 대한 개별적인 연구가 많이 진행되었으나(정 등 1989; Shim et al. 1992), 물리환경특성에 따른 하위영양단계(영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤)에 대한 종합적인 연구를 수행한 예는 없다. 따라서 본 연구에서는 2008년 8월 울릉분지에서 수행된 다학제적 종합 관측을 통해 2008년 하계 울릉분지에 작용하는 주요한 물리적인 외압요인인 북쪽에서 내려오는 북한한류수(North Korea Cold Water, NKCW), 남쪽에서 북상하는 동한난류(East Korean Warm Current, EKWC), 연안용승(Coastal upwelling), 그리고 울릉난수성 소용돌이(Ulleung Warm Eddy, UWE)의 물리·화학적 환경특성과 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 군집조성과의 관련성에 대해서 알아보았다.

2. 재료 및 방법

여름철 동해 울릉분지 해역의 해수 물성과 생지화학적 특성, 식물 및 동물플랑크톤 군집 구조와 이들 상호간의 관계를 파악하기 위하여 울릉분지를 2008년 8월 6일부터 14일에 걸쳐 국립해양조사원의 해양2000호를 이용하여 다학제적인 관측이 이루어졌다(Fig. 1). CTD 관측은 총 80개의 정점에서 표층부터 해저면에 이르는 전 수층에 대해 이루어졌으며, 총 54개 정점에서 표층부터 수심 100 m에 이르는 수심에서 영양염 분석을 위한 시료가 채취되었고, 11개 정점에서 식물플랑크톤 군집 분석을 위한 시료를, 26개 정점에서 동물플랑크톤 시료가 채취되었다(Fig. 1).

남쪽에 위치한 단면 EE, D, ED는 8월 6~7일 사이에 관측이 이루어졌으며, 동해안으로부터 울릉도-독도 사이의 단면 EA와 조사해역 가장 북쪽에 위치한 단면 TEA는

Fig. 1. Station map for the oceanographic survey conducted between Aug. 6 and 14, 2008. Isobaths are shown at 500 m intervals.

8월 8~10일에 그리고 37°N을 동서로 가로지르는 단면 EB와 남쪽의 단면 ED는 8월 10~13일에 관측이 이루어졌다. 부산 근해 단면 SA는 가장 마지막 날인 8월 14일에 관측이 실시되어 전체적으로 약 8일간에 걸쳐 관측이 이루어졌다.

CTD

SBE911 plus CTD에 용존산소와 형광센서를 장착하여 수심 별 수온, 염분 뿐만 아니라 수층 내의 용존산소와 식물플랑크톤의 수직분포를 연속적으로 관측하였다. 수온과 전기전도도 센서의 경우 2008년 3월에, 용존 산소 센서는 2008년 5월에 제작사를 통해 보정되었다. 자료처리는 CTD 제작사가 제공하는 소프트웨어(Seasoft)를 이용하였고, 이때에 사용되는 제반 계수들은 동해에 최적한 값들을 사용하였다(Kim and Kim 1999). 관측자료는 1 dbar 간격으로 평균을 낸 후 해수의 물리 특성 분포를 분석하는데 사용하였다.

조사기간 중 획득한 CTD 자료 외에 관측 기간 중 대한 해협에 투하한 인공위성 추적 부이 경로 자료를 이용하였다. 인공위성 추적 부이는 holey-sock 형태의 표준 Argos 부이로서 drogus가 15 m에 부착된 것이다. Argos 부이는 8월 5일 저녁 9시경 대한해협에 투하하여 9월 11일까지 38일간 자료를 획득하였다.

영양염 분석

영양염 분석을 위한 해수시료는 CTD 로켓 시료채취기에 부착된 10 l 니스킨 채수기를 이용하여 채수하였고, 해수 시료를 47 mm GF/F 여과지로 여과한 다음 125 ml 폴리에틸렌 병에 넣어 즉시 냉동보관(-20°C 이하)하였다. 영양염 분석은 실험실에서 냉동된 시료를 상온에서 녹인 후 자동영양염 분석기(Futura plus II, Alliance Co.)로 질산염+아질산염, 인산염, 규산염 등을 분석하였다. 본 연구에서는 동해에서 일반적으로 질산염이 식물플랑크톤 성장을 조절하는 요인(정 등 1989)으로 알려져 있기 때문에 질산염+아질산염의 농도를 대표 영양염으로 기술하였다.

엽록소 분석

엽록소 분석을 위한 시료는 니스킨 채수병으로부터 해수시료를 300 ml를 채취하여서 25 mm GF/F 여과지에 여과한 후에 선상에서 90% 아세톤 6 ml로 24시간 동안 냉동실(-20°C 이하)에서 추출한 후 Turner 형광광도계(10-005R)로 형광을 측정 한 후 10% 염산을 넣고 90초 후에 다시 측정하여 산처리 전후의 형광값으로 phaeo-pigment 값을 보정하여 엽록소 농도를 계산하였다(Parsons et al. 1984).

식물플랑크톤 광합성색소 분석

식물플랑크톤의 광합성색소 분석을 위한 시료는 secchi depth로부터 계산된(Pool and Atkins 1929) 표층 광량의 100, 50, 30, 15, 5, 1%에 해당하는 수심에서 약 2 l를 채수하여 25 mm GF/F 여과지로 여과하였다. 여과지는 알루미늄 호일에 싸서 HPLC 분석 전까지 초저온 냉동고(-80°C)에 보관하였다. 식물플랑크톤의 광합성색소는 100% 아세톤 5 ml로 냉암소에서 24시간 이내에 추출하였으며, 색소 추출 및 분쇄시 발생할 수 있는 시료의 손실을 보정하기 위해서 canthaxanthin (internal standard) 50 µl를 첨가하였다(Wright et al. 1991; Jeffrey 1997). 추출 후 분석 직전에 cell의 파쇄를 위하여 초음파 분쇄를 5분간 실시하고 2500 rpm에서 10분간 원심분리 후, 상등액 1 ml를 취하여 300 µl의 이온교환수와 잘 섞은 후, 100 µl의 loop에 주입하여 HPLC(Shimadzu systems, Japan)로 분석하였다. 색소분리를 위한 용매 gradient와 flow rate는 Zapata et al. (2000)에 의해서 제시된 방법을 이용하였다. 표준색소는 엽록소-a (Sigma Co., USA)와 엽록소-b, fucoxanthin, peridinin, zeaxanthin, lutein, 19'-hexanoyloxy-fucoxanthin, 19'-butanoyloxy-fucoxanthin, neoxanthin, prasinoxanthin, alloxanthin, violaxanthin(DHI, Denmark)을 구입하여 이용하였다. 엽록소-a에 대한 각 군집별 식물플랑크톤의 기여도는 Mackey et al. (1996)에 의해서 개발된 CHEMTAX 프로그램을 이용하여 추정하였다.

동물플랑크톤 개체수 및 군집조성

동물플랑크톤 채집은 총 27 정점에서 붓고 네트(망구 60 cm; 망목 150 µm, 330 µm)를 사용하여 각 정점에서 45~300 m의 깊이에서 표층까지 경사채집을 실시하였다. 여과량은 네트 안쪽에 달린 유량계의 회전수로부터 계산되었다. 채집된 시료는 95% 또는 99% 에탄올을 사용하여 현장에서 고정 한 후 실험실로 운반하여서 정성분석과 정량분석을 하였다. 실험실에서 Folsom 분할기를 이용하여 약 1000~1500개체가 되도록 시료를 분할하여 해부현미경으로 가능한 낮은 분류 계급까지 동정 후 계수하였다. 생물량은 네트에 부착된 유량계로 여과량을 추정 한 뒤 individual(ind.) m⁻³로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

물리환경

울릉분지에 출현하는 동해고유수 상부의 수괴는 대마난류수와 동해중층수로 보고되었다(Kim and Chung 1984). 여름철 대마난류수는 계절적 수온약층의 발달에 따라 고온, 저염인 대마난류 표층수(Tsushima Surface Water,

TSW)와 그 아래에 고염의 특성을 유지하는 대마난류 중층수로 이루어져 있다(Chang et al. 2002b). 염분최소층으로 특징지어지는 동해중층수는 서일본분지에서 형성된 후 울릉분지로 남하하며(Kim and Kim 1999; Yun et al. 2004), 일반적으로 수온 1.0~5.0°C 범위를 갖고 염분은 34.06 이하이다(Kim and Kim 1999). 동해중층수는 동해안을 따라 분포하며 북한한류수로 불리는 연안모드와 극전선역에서 대마난류수 하부로 침강 후 울릉분지에 출현하는(Kim et al. 1991) 외해모드의 두 가지로 구분된다. 연안모드는 다소 낮은 수온을 보이며(Cho and Kim 1994) 동해안을 따라 남하하는 북한한류에 의해 수송된다(김과 김 1983). 북한한류수는 동한난류나 울릉분지에 준-영구적으로 출현하는 울릉난수성 소용돌이에 의해 외해로 확장되기도 하며(Shin et al. 1998), 또한 대한해협에 출현하는 대한해협 저층냉수의 기원이 된다(Cho and Kim 1998).

울릉분지의 상층순환에서 가장 먼저 고려되어야 하는 것은 외부변인인 동한난류의 거동이라 지목된다. 대한해협을 통해 유입된 대마난류는 대한해협 동북방에서 분지하여 그 중 하나는 동해안을 따라 북상하는 동한난류를 형성한다. 이 해류는 대략 위도 37°N 부근에서 동해안을 따라 남하하는 북한한류와 합류한 뒤 이안하여 사행하면서 동진한다. 북한한류의 일부는 동한난류 하부에서 대륙붕 사면을 따라 계속 남진하여 대한해협에 이른다(Chang et al. 2002a).

울릉분지에서 상층순환에 중요한 내부변인은 울릉난수성 소용돌이와 연안용승이다. 동한난류의 사행과 서안 경계류의 음와도 분산에 의해 울릉도 남서쪽 해역에는 시계 방향의 중규모의 울릉난수성 소용돌이가 형성되는 것으로 알려져 있다(An 1974; Cho et al. 1990; Kim et al. 1991; Chang et al. 2004). 울릉난수성 소용돌이는 동한난류의 사행에 의해 형성되어 수심의 제약을 받아 주로 울릉도 남쪽 혹은 남서쪽 해역에 그 중심이 나타나고(Ahn et al. 1994), 수개월 혹은 최장 2년에 걸쳐 울릉분지에 나타난다(Mitchell et al. 2005; Shin et al. 2005). 겨울철에는 냉각에 의해 소용돌이 내부가 균질해지는 반면(Chang et al. 2004) 여름철에는 소용돌이 상부가 성층화 되면서 표층에는 상대적으로 저염수가 분포하고(Shin et al. 2005), 그 아래 수온균질층 상부에 고염수가 분포한다. 이러한 소용돌이의 시·공간적 변동은 영양염의 수직, 수평 분포를 조절하게 되고 생태계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Yoo and Park 2009; Kim et al. 2010).

여름철에 한반도의 남동해안에서는 지형적인 조건과 남서풍 계열의 바람의 영향으로 용승이 자주 일어난다(Lee 1983; 이 1998). 최근의 연구에 의하면 단순한 바람의 작용뿐만 아니라 남동해역의 강한 해류가 연안용승이 일어

나기 전에 냉수괴를 해안표층부근으로 이동시켜 바람에 의한 용승이 일어나기 쉽게 한다고 주장하였다(김 2008). 연안용승은 영양염이 고갈된 표층에 영양염을 공급하여 연안의 일차생산을 강화시킨다. Hyun et al. (2009)와 Yoo and Park (2009)는 동한난류에 실려 울릉분지 내부로 수송되어 여름철 생태계에 에너지를 공급하는 가장 중요한 메커니즘이라고 주장하였다. 본 연구에서는 연구 해역의 물리환경 특성을 관측 해역의 남쪽에 위치한 울기 외해 단면(EE 단면)과 37°N을 따라 동해안으로부터 독도 남쪽에 이르는 EB 단면, 동해시로부터 울릉도를 거쳐 독도 인근에 이르는 EA 단면을 중심으로 기술하였다.

EE 단면

울기 외해 정선EE단면의 수온, 염분, 밀도, 용존산소 분포특징은 이 해역에서는 여름철에 주로 관측되는 고온 저염을 특징으로 하는 표층의 대마난류 표층수, 고온 고염의 대마난류 중층수, 그 밖에 10°C 이하의 저온과 상대적으로 높은 용존산소량을 특징으로 하는 대한해협 저층냉수(김과 김 1983; Chang et al. 2004; Yun et al. 2004)가 나타남을 잘 보여준다(Fig. 2).

정점 EE2로부터 외해역으로 20°C 이상, 염분 33.5 이하의 고온 저염의 대마난류 표층수가 연안에서는 약 10 m, 외해에서는 약 30 m 수심까지 분포하고 있으며, 대마난류 표층수의 바닥근처에는 강한 수온약층이 20~25°C 사이에서 나타났다. 동해에서 여름철 계절적 수온약층 상부에 주로 나타나는 대마난류 표층수는 동중국해의 장강 희석수가 고염인 대마난류 중층수와 함께 동해로 유입된 해수로 보고되어 왔으며, 수온 20°C 이상, 염분 33.8 이하로 정의된 바 있다(공과 박 1969; 박 1978; Byun 2000).

대마난류 표층수 아래에는 수온 약 12~15°C, 염분 34.30 이상의 고온 고염의 대마난류 중층수가 존재하는데 상대적으로 용존산소량이 낮으며($\sim 180 \mu\text{mol kg}^{-1}$) 대부분의 정점에서 관측되었다. 대마난류 중층수 아래에는 10°C 이하의 차고 비교적 높은 용존산소량($>180 \mu\text{mol kg}^{-1}$)과 34.30 이하의 염분 특성을 가지는 대한해협 저층냉수가 EE 단면의 모든 정점 해저면 근처에서 관측되었다(Fig. 2). 김과 김 (1983)은 저염과 비교적 높은 용존산소량을 특징으로 하는 북한한류계수가 동해안을 따라 대한해협 서수도 입구까지 분포할 수 있다고 하였으며, Yun et al. (2004)는 동해 북부 블라디보스토크 연안에서 겨울철에 발달한 북한한류계수가 봄철부터 강릉 외해에 영향을 미치기 시작하여 여름과 가을철에는 대한해협까지도 영향을 미친다고 보고하였다. 저염과 비교적 높은 용존산소량을 특징으로 하는 냉수가 2008년 8월에 관측된 모든 단면의 연안정점의 수심 100 m를 중심으로 관측된 것과 EE 단면

Fig. 2. Vertical sections of (a) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) density (σ_{θ}), (d) dissolved oxygen ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), (e) chlorophyll-*a* from fluorometer (mg m^{-3}), and (f) nitrate+nitrite concentration (μM) along line EE on Aug. 6.

의 해저면 근처에서 나타나는 10°C 이하의 냉수가 저염과 비교적 높은 용존산소량을 고려할 때 북한한류계수의 영향으로 볼 수 있다.

EE 단면의 수온, 염분, 용존산소량 분포의 특징은 등치선이 외해로부터 연안에 가장 인접한 EE1 정점까지 알아지는 구조이다. 수온 25°C , 염분 33.5의 등치선은 외해로부터 연안을 향해 알아지면서 정점 EE1과 EE2 사이에서 표층과 접하고 있다. 연안에 가장 인접한 EE1 정점의 표층수온은 외해의 EE4 정점에 비교하여 11°C 만큼 낮다. 동일한 수심대에서 연안에서 가장 낮은 수온 분포는 표층뿐만 아니라 모든 수심대에서 동일하게 나타난다. EE 단면 해역인 울산, 감포 해역에서는 연안용승 현상이 빈번하게 보고되어 왔다(Lee 1983; Byun and Seung 1984; Lee and Na 1985; Yoo and Park 2009). Yoo and Park (2009)

은 1998~2006년 동안의 인공위성에서 관측된 엽록소-*a* 영상자료로부터 울기연안에서 6~9월 사이에 연안용승의 발생비율이 평균 58%라고 보고하였다. EE 단면 연안의 물성구조는 연안용승에 의한 것으로 볼 수 있다. 국립수산과학원 울기 연안정지관측소에서 관측된 표층수온 자료에 따르면 EE 단면 관측이 진행된 8월 6일을 중심으로 표층수온이 약 $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ 가량 급격하게 낮아졌음을 알 수 있다(Fig. 3a). 이러한 표층수온의 하강은 7월 7일, 7월 25일 무렵에도 발생하였다. 2008년 7월 30일~8월 6일에 걸쳐 울기에서 관측된 기상청 자료에 따르면 EE 단면에서 물성관측이 이루어진 8월 6일 이전인 8월 1~3일에 걸쳐 약 4 m s^{-1} 의 남서풍이 지속적으로 관측되었으며, 이후에는 약 2 m s^{-1} 이하의 약한 북동풍이 우세하였다(Fig. 3b). 즉, 울기 표층 수온자료에 의해 8월 4일부터 표층수온의 급격

Fig. 3. (a) Surface water temperature from July 1 to Aug. 31, 2008 observed from Ulgi Coastal Observatory by National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), KOREA. (b) Hourly AWS wind at Ulgi from Jul. 30 to Aug. 6, 2008. Wind data was archived from the Korea Meteorological Administration website (<http://www.kma.go.kr>).

한 하강이 시작되었음을 고려할 때, 남서풍이 불기 시작한 후 3일이 경과된 때부터 바람에 의한 연안용승이 발생해서 표층수온이 하강하였다. 정점 EE1과 EE2의 경우, 등밀도면의 경사를 고려할 때 연안용승에 의해 해저지형을 따라 표층을 향하여 수심별로 약 20 m 이내의 규모에서 용승이 발생할 수 있을 것으로 고려된다.

EB 단면

수온 20°C 이상, 염분 33.50 이하의 고온 저염을 특징으로 하는 대마난류 표층수는 EB3~EB7U, EB9~EB10의 표층에 약 20 m 이내의 두께로 나타나지만, 정점 EB8의 표층에는 염분 33.50 이하의 저염수가 나타나지 않아 대마난류 표층수가 연안과 외해에 각각 분리되어 나타나고 있는 것이 특징적이다(Fig. 4).

대마난류 표층수 아래로는 염분 34.30 이상, 수온 10~19°C를 갖는 고온 고염의 대마난류 중층수가 수심 약 130 m 상부에 나타난다. 특히, 대마난류 중층수는 울릉도 바로 남쪽 정점인 EB8을 중심으로 사발모양의 등온선 분포를 보인다. 정점 EB8의 경우, 수온 10~11°C, 염분 34.31~34.36의 비교적 균질한 해수가 24 m 두께로 나타난다. 그러나 이러한 균질층의 두께는 바로 남쪽 단면인 EC 단면의 EC7A 정점보다는 얇다. EC 단면에서도 EC7A를 중심으로 EB 단면과 유사한 사발모양 구조가 나타나며, 정점 EC7A에서는 수온 10~11°C, 염분 34.32~34.36을 갖는 균질층이 45 m 두께로 나타난다. 수심 200 m에서의

수온, 염분 분포는 EC7A 정점에서 수온과 염분이 주변에 비해 가장 높아 이러한 사발모양의 구조가 EB 단면에 비해 EC 단면에서 EC7A를 중심으로 발달하고 있는 것으로 판단된다(Fig. 5). 이러한 사발모양 구조는 지형류 계산으로부터 울릉난수성 소용돌이(Ulleung Warm Eddy, UWE)와 관련된 것으로 보인다. 정점 EC7A 근처를 중심으로 발달된 소용돌이 구조에 의해 EB 단면의 표층에 나타나는 EB8 정점을 중심으로 분리된 대마난류 표층수 구조가 나타난 것으로 고려된다. 즉, 소용돌이 주변을 감고도는 저염의 표층 streamer에 의한 영향으로 고려할 수 있다.

EA 단면

울릉도는 정점 EA7과 EA8 사이에 위치하며, EA8로부터 EA12까지는 한국해저간극(Korea Gap)를 가로지른다. 수온 20°C 이상, 염분 33.50 이하의 고온 저염을 특징으로 하는 대마난류 표층수는 EA7~EA10, EA12의 표층에 약 10 m 이내의 두께로 나타나지만, EA1~EA6 정점의 표층에는 염분 33.50 이하의 저염수가 나타나지 않아 대마난류 표층수가 외해로 향하여 분포하였다(Fig. 6). 그러나 EA 단면의 외해에 나타나는 저염의 표층수는 EA 단면 바로 남쪽의 EB 단면의 EB6 정점 표층의 염분 32.03에 비교할 때 염분 약 1.5 만큼 고염이다(Fig. 7). 즉, 대마난류 표층수가 북쪽으로 갈수록 염분이 점차 증가하는 경향을 보여 준다.

수온약층은 연안정점의 경우 약 10 m 부근에서 외해에

Fig. 4. Vertical sections of (a) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) density (σ_{θ}), (d) dissolved oxygen ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), (e) chlorophyll-*a* from fluorometer (mg m^{-3}), and (f) nitrate+nitrite concentration (μM) along line EB on Aug. 10-12.

Fig. 5. Horizontal distributions of (a) temperature and (b) salinity at 200 m.

Fig. 6. Vertical sections of (a) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) density (σ_{θ}), (d) dissolved oxygen ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), (e) chlorophyll-*a* from fluorometer (mg m^{-3}), and (f) nitrate+nitrite concentration (μM) along line EA on Aug. 8-9.

서는 약 20 m 근처에서 형성된다. 수온약층 아래로는 염분 34.30 이상의 대마난류 중층수가 연안정점(EA2, EA3)에서는 수심 20 m 근처에서 약 10 m 두께로, 외해정점(EA6~EA12)에서는 최대 약 90 m 두께로 관측된다. 그러나 대마난류의 중층수의 핵이 연안정점과 외해정점에서 서로 분리되어 있어 서로 다른 기작에 의해 순환하는 것으로 고려된다. 이러한 대마난류 중층수의 연안과 외해에서의 구별은 용존산소량에서도 유사하게 나타난다.

대마난류 중층수 아래로 수심 150 m 이내의 경우, EA6과 EA7 사이를 경계로 연안 정점에서 외해에 비교하여 저염과 비교적 높은 용존산소량을 특징으로 하는 냉수가 나타나며, EA1~EA4 정점의 약 100 m 근처에서 염분 최소층이 관측된다. 이 냉수는 기존의 연구에서 수온 1~5 $^{\circ}\text{C}$, 염분 34.06 미만을 가지며, 염분 최소층을 특징으로 하는

동해중층수로 분류될 수 있다(Kim and Kim 1999; Yun et al. 2004). 동해 중층수는 연안모드와 외해모드로 구분되어 왔으며, 동해중층수의 연안모드는 북한한류수로 고려되어 왔다(Cho and Kim 1994). 즉, 대마난류 중층수 아래에 나타나는 저염, 외해에 비교하여 높은 용존산소량의 수괴는 동해안을 따라 남하하는 북한한류수와 관련된 것으로 볼 수 있다.

2008년 8월 상층 순환

관측을 시작한 8월 5일에 대한해협 SA 단면에서 인공 위성 추적 Argos 부이가 투하되었다. Argos 부이는 투하된 후 북북동 방향으로 북상하여 약 일주일 후인 8월 13일에는 37 $^{\circ}\text{N}$ 에 도달하였다(Fig. 7). 부이의 경로로부터 계산한 해류 속도는 4.7~33.6 cm s^{-1} 의 범위를 가지며, 특히

Fig. 7. Horizontal distributions of (a) temperature and (b) salinity at 5 m depth. Daily positions at 00h:00m of an Argos drifter drogued at 15 m depth between Aug. 5 and 29, 2008 are also indicated by +.

단면 EE를 통과할 때 유속이 33.6 cm s^{-1} 로 가장 크게 나타났다. 부이가 단면 EA에 도착하기까지 부이의 경로는 연안에 인접하기 보다는 외해로 이안하여 이동하고 있으며, 특히, 이러한 궤적은 대마난류 표층수의 분포와 매우 유사하다. 즉, EC 단면에서 표층의 염분이 가장 낮은 EC6A와 EB 단면에서 표층의 염분이 가장 낮은 EB6 정점 근처를 통과하였다. EA 단면에 도착하기 전까지 북북동을 향하던 부이는 8월 19일에 EA 단면에 도착하자 급격하게 동쪽으로 선회하여 울릉도를 통과한 후 다시 북동쪽으로 향하고 있다. EA 단면에서 동쪽에서의 급격한 선회는 EC7A를 중심으로 형성된 울릉난수성 소용돌이와 관련된 것으로 볼 수 있다. 즉, EC 단면의 EC7A를 중심으로 한 소용돌이의 영향으로 부이가 급격하게 동쪽으로 선회한 것으로 볼 수 있다. 8월 20일에 울릉도 서쪽에 도달한 후 북동으로 방향을 바꾸어 21일에는 울릉도 북서쪽에 위치하며, 다시 남동쪽으로 움직여 울릉도 동쪽에 도달 후 23~25일까지 정체되어 있다가 25일에 북동쪽으로 이동하였다. 울릉도 주변에서의 부이의 이동은 부이가 EC7A를 중심으로 형성된 소용돌이를 이탈했거나 혹은 다른 기작에 의한 순환에 부이가 합류되었을 것으로 고려할 수 있다.

CTD 관측 자료와 Argos 부이 자료로부터 2008년 8월의 동해 남서부 해역의 상층순환은 $37^{\circ}30'N$ 북쪽에서 연안을 따라 EE단면의 저층까지 남하하는 북한한류수, 울기감포해역에서 지속적인 남서풍과 지형적인 조건에 의한 연안용승, 대마난류 중층수와 더불어 대한해협을 통과한 후에 동해연안을 따라 북상한 후에 $37^{\circ}N$ 근처에서 외해로

향하였다가 일부는 시계방향으로 회전하는 울릉난수성 소용돌이의 영향으로 독도 남쪽에서 다시 남쪽으로 향하며 다른 일부는 북서향하는 대마난류 중층수와 함께 북서향하는 대마난류표층수로 구별될 수 있다(Fig. 7). 울릉난수성 소용돌이는 EC 단면의 EC7A 정점을 중심으로 북쪽으로는 $37^{\circ}30'N$ 근처까지도 영향을 미치는 것으로 고려된다.

질산염+아질산염 수직분포 특성

질산염+아질산염의 표층 농도는 정선 EE 가장 연안 정점 EE1과 EE2에서는 질산염+아질산염의 표층농도는 $2 \mu\text{M}$ 이하였고, 수심 약 20~50 m 사이에서 질산염+아질산염 농도는 $7.5\sim 10 \mu\text{M}$ 범위에 있었다. 앞서 설명한 수온, 염분 및 용존산소의 특성으로 보아 20~50 m 사이의 높은 질산염+아질산염 농도는 대한해협을 통해 유입되는 대마난류 중층수의 영향으로 판단된다. 또한 수심 50 m 이심에서 질산염+아질산염이 $10 \mu\text{M}$ 이상이었는데, 이곳의 수온은 10°C 이하이고 염분은 34.3 이하였고, 용존산소는 $180 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 보다 높은 것으로 보아 대마난류 중층수의 영향보다는 대한해협 저층냉수의 특징을 보였다(Fig. 2). 따라서 대한해협에 영양염인 질산염+아질산염을 공급하는 두 가지 경로는 수심 20~50 m 사이에서 북상하는 대마난류 중층수와 바닥에서 약 20~30 m에 존재하는 대한해협 저층냉수인 것으로 보인다.

정점 EE1과 EE2는 연안용승에 의해서 표층의 질산염+아질산염의 농도가 높을 것으로 예상되나 실제관측에서는 표층에서 질산염+아질산염의 농도가 $2 \mu\text{M}$ 이하의 낮은

농도가 관측되었다. 이는 표층 엽록소-*a*의 농도가 높은 것으로 보아 식물플랑크톤의 흡수로 연안 용승에 의해 공급된 질산염+아질산염이 소비된 것으로 보인다(Fig. 2). 정점 EE3 보다 외해서는 질산염+아질산염의 농도가 낮은 ($<3 \mu\text{M}$) 등치선이 수심 40~50 m까지 확장되어 있다. 이곳의 염분과 용존산소의 특징은 EE1과 EE2의 수심 약 20~50 m 사이에서 나타난 대마난류 중층수와 유사하였으나 정점 EE3 보다 외해역의 수심 20~40 m 사이에 강하게 형성되어 있는 아표층 엽록소-*a* 최대층에서 영양염의 소모에 의해서 감소한 것으로 사료된다(Fig. 2).

정선 EB의 모든 정점의 표층 20 m 이내에서는 질산염+아질산염 농도는 $2.5 \mu\text{M}$ 이하의 낮은 값이 나타났고, EB7보다 외해에 위치한 정점들에서는 질산염+아질산염의 농도가 $2.5 \mu\text{M}$ 이하의 낮은 농도층이 수심 약 50 m까지 확장되었다(Fig. 4). 그러나 연안에서 약 50 km 이내에 위치한 정점들에서는 수심 10 m 보다 깊은 곳에서 질산염+아질산염의 농도가 급격하게 증가하여 수심 약 75 m 정도에서는 농도가 $17.5 \mu\text{M}$ 이상이 나타났다. 정점 EB3에서 EB6C까지 수심 20~50 m 사이 수괴의 용존산소는 대한해협 중층을 통해 유입된 대마난류 중층수와 일치하였다. 그리고 이 수괴의 질산염+아질산염의 농도 또한 대한해협에 있는 대마난류 중층수와 유사한 값을 보였다. 정점 EB1에서 EB3 사이의 수심 약 75 m의 높은 질산염+아질산염 농도($17.5 \mu\text{M}$)가 관측된 수괴의 특성은 연안을 따라서 남하하는 북한한류계수의 특성(수온 $5\text{--}10^\circ\text{C}$, 염분 $34.0\text{--}34.3$, 용존산소 $>200 \mu\text{mol kg}^{-1}$)을 보였다(Fig. 4). 그러나 정점 EB7부터 EB9까지 표층의 수온, 염분 및 용존산소 특징은 대한해협에서 나타난 대마난류 중층수가 북상하는 동한난류와 유사하였지만 질산염+아질산염의 농도는 대마난류 중층수 보다 낮았다. 즉 울릉난수성 소용돌이 상층부(0~75 m)는 질산염+아질산염의 농도가 낮았다(Fig. 4).

정선 EA에서 10 m 이내의 수심에서 질산염+아질산염의 농도는 $1 \mu\text{M}$ 이하로 낮았고 30 m에서 급격히 증가하여 50 m 보다 깊은 수심에서는 $10 \mu\text{M}$ 이상의 높은 농도가 나타났다. 정선 EA의 연안에 위치한 정점 EA1에서 EA5까지 질산염의 농도가 급격히 증가하는 수심 10 m에서 50 m 사이의 수온, 염분, 용존산소는 한반도 동쪽연안을 따라 남하하는 북한한류계수의 특징을 보인 곳과 일치하였다. 그러나 정점 EA6에서 EA8 질산염+아질산염의 농도가 급격하게 증가하는 수심 20 m에서 50 m 사이의 수온, 염분, 용존산소는 대한해협을 통해 유입된 대마난류 중층수(수온 $\sim 15^\circ\text{C}$, 염분 $34.10\text{--}34.35$, 용존산소 $<200 \mu\text{mol kg}^{-1}$)의 특징을 보였다(Fig. 6).

식물플랑크톤 생체량

2008년 하계에 동해 남부해역에서 관측한 물리, 화학적

인 특징의 수직수평 분포는 연안 용승역, 울릉난수성 소용돌이, 북한한류의 영향을 받는 해역으로 뚜렷하게 구분되었다(Fig. 2, 4, 6, 7). 엽록소-*a* 농도는 용승이 일어나고 있는 울기 근처의 연안에 가장 가까운 정점의 표층에서 $7.8\text{--}8.8 \text{ mg m}^{-3}$ 으로 가장 높고 수심에 따라 급격하게 감소하였다(Fig. 2). 그 이외의 대부분의 정점에서는 표층 엽록소-*a*가 0.3 mg m^{-3} 이하의 낮은 값이 나타났고 수심 20~50 m 사이에서 $1\text{--}2.3 \text{ mg m}^{-3}$ 의 높은 값을 가지는 아표층 엽록소-*a* 최대층(subsurface chlorophyll-*a* maximum; SCM)이 형성되어 있다. SCM층의 엽록소-*a* 농도는 대체적으로 연안역에서 높았고 외해로 나갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 그리고 SCM 수심은 연안에서 외해로 갈수록 깊어졌다(Fig. 2, 4, 6).

동해 울릉분지에서 SCM층의 존재는 이전의 연구에서 보고 되었다(Shim and Park 1996). 이들에 의하면 동해 남동해역에서 나타나는 SCM층은 표층에서 침강하는 식물플랑크톤이 밀도약층에 의해서 침강속도가 줄어들어 단 순히 집적되어 형성된 것이 아니라 밀도약층 아래에서 공급되는 영양염을 이용한 식물플랑크톤의 성장에 의한 것이다. 다른 가능성으로 식물플랑크톤이 낮은 광조건에 적응하기 위해서 단위세포당 엽록소 수를 증가시킬 가능성도 제시하였다.

본 연구에서 관측된 SCM층이 나타나는 수심은 영양염이 수심에 따라 급격하게 증가하는 깊이와 일치한다(Fig. 2, 4, 6). SCM층의 수심은 질산염+아질산염의 농도가 약 $7.5\text{--}10.0 \mu\text{M}$ 이고 용존산소의 농도가 낮은 대마난류 중층수 특징을 가지는 수괴 상부에 위치하고 있다(Fig. 2, 4, 6). 이는 상대적으로 영양염이 풍부하고 저온·고염의 대마난류 중층수가 표층 아래를 통과하면서 대마난류 중층수에 포함된 영양염이 상층으로 공급되기 때문에 식물플랑크톤의 지속적인 성장이 이루어 질 것으로 예상된다.

정 등 (1989)에 의하면 울릉분지에서 수직확산에 의해 표층으로 공급되는 영양염의 양이 다른 해역에 비해 많은 것으로 알려져 있으나 수직확산에 의해서 공급되는 양은 식물플랑크톤이 필요로 하는 질소량의 약 7%를 차지하는 것으로 보고되었다. 그러나 중형 동물플랑크톤에 의한 유기물의 재순환에 의해서 공급되는 질소는 일일 필요량의 약 7.3%를 차지 하는 것으로 알려져 있다. 그리고 미세 동물플랑크톤에 의해 재순환되는 질소는 직접 추정되지 않았지만 식물플랑크톤의 질소 요구량의 약 35%를 차지 할 것으로 추정하였다(정 등 1989). 따라서 수직확산과 재순환 이외의 다른 과정들에 의해 SCM층의 식물플랑크톤은 영양염을 공급받는 것으로 판단된다.

영양염의 공급원으로 고려해 볼 수 있는 다른 과정들은 북한 한류의 수평적인 이동 또는 대마난류와 표층수사이의 와류성 혼합이 수직적인 질산염 이동을 촉진할 수 있

Fig. 8. Map showing the distribution of water masses near the surface.

을 것이다. Ashjian et al. (2005)에 의하면 밀도약층이 위쪽으로 볼록한 곳이 아래쪽으로 볼록한 곳보다 형광의 강도가 더 컸다. 이는 밀도약층 아래에 있는 영양염이 풍부한 물이 위로 볼록한 곳을 따라서 쉽게 이동하여 부족한 영양염을 공급하는 것으로 사료된다.

수심 50 m까지 적분된 엽록소-*a* 농도는 용승이 일어나고 있는 정점 EE1과 D1에서 각각 182 mg m^{-2} , 211 mg m^{-2} 로 높게 나타났다(Fig. 9). 수심 50 m까지 적분된 엽록소-*a*의 공간분포는 연안에서부터 130.5°E 사이의 정점들에서는 $30\sim 50 \text{ mg m}^{-2}$ 의 범위가 나타났고 130.5°E 보다 동쪽에 위치한 외해의 정점들에서는 30 mg m^{-2} 이하의 값이 나타났다. 수심 50 m까지 적분된 질산염+아질산염 농도는 용승이 일어나는 해역과 북한한류의 영향을 받는 36°N 이북의 연안에 높게 나타났고 외해쪽에는 낮게 나타났다(Fig. 9). 특히 외해쪽의 50 m까지 적분된 질산염의 농도가 낮은 해역과 울릉난수성 소용돌이의 위치가 일치하였다.

식물플랑크톤 광합성 색소

주요 색소의 수직분포는 대체로 엽록소-*a* 최대 농도 수심 10~30 m 사이에서 최대값을 보였다(Fig. 10). 표층 광량 1% 도달 수심으로 정의되는 유광층 내에서 적분한 광합성색소 중 diatoms의 지시 색소인 fucoxanthin과

Fig. 9. Horizontal distributions of integrated nitrate+nitrite (mmol m^{-2}) and chlorophyll-*a* (mg m^{-2}) concentrations from the surface to 50 m in the Ulleung Basin of the East Sea during August 2008.

cyanobacteria의 지시 색소인 zeaxanthin은 서로 다른 농도 분포 특징을 보였다(Fig. 10). Fucoxanthin은 용승이 일어나고 있는 연안 정점 EE1과 D2에서 90 mg m^{-2} 와 41 mg m^{-2} 로 가장 높게 나타났으며, 북한한류계수의 영향을 받

Fig. 10. Vertical profiles of photosynthetic pigment concentrations in the Ulleung Basin of the East Sea during August 2008. Stations were categorized based on hydrographic condition and geographic location (NKCC, North Korea Cold Current; UWE, Ulleung Warm Eddy).

Table 1. Marker pigment concentrations (mg m^{-2}) integrated in the euphotic zone (<light 1%) in the East Sea. Abbreviations are as follows: Peri, peridinin; 19'-bf, 19'-butanoyloxyfucoxanthin; Fuco, fucoxanthin; 19'-hf, 19'-hexanoyloxyfucoxanthin; Neo, neoxanthin; Prasino, prasinoxanthin; Viola, violaxanthin; Allo, alloxanthin; Lut, lutein; Zea, zeaxanthin; Chl *b*, chlorophyll *b*; and, Chl *a*, chlorophyll *a*

	Perid	19'-bf	Fuco	19'-hf	Neo	Prasino	Viola	Allo	Lut	Zea	Chl <i>b</i>	Chl <i>a</i>
EE1	7.43	1.40	89.5	1.41	0.16	2.51	0.27	1.36	0.09	0.24	4.68	111
D2	11.0	1.07	40.9	5.89	0.56	4.97	0.17	0.89	0.00	1.59	7.24	69.6
EC1	10.3	3.33	31.7	4.28	1.53	7.79	0.14	2.94	0.68	1.38	20.7	75.2
EB1	0.24	7.24	2.20	1.00	1.94	14.1	0.17	1.68	0.24	0.01	15.3	36.3
TEA1	0.93	4.86	15.3	8.15	0.46	12.4	6.99	6.04	6.02	0.00	21.7	83.9
ED4	0.00	16.3	1.19	1.74	0.51	11.2	0.00	1.30	0.00	0.00	8.86	43.5
EA3	3.90	3.60	17.8	21.0	1.57	6.01	0.06	6.88	0.57	4.21	17.8	72.1
EB7	1.87	1.57	1.34	0.29	1.21	0.08	3.93	0.61	0.23	0.04	50.2	31.0
EB8	0.00	3.00	18.3	8.50	1.17	3.04	0.00	0.57	0.29	5.75	9.75	51.2
TEA8	0.46	1.67	11.3	22.2	0.00	4.19	2.41	3.04	5.83	0.00	8.80	57.6
EA10	0.86	2.43	8.97	5.46	0.22	2.89	0.00	0.29	0.00	8.97	6.24	36.2

는 북쪽 연안에 위치한 정점인 TEA1와 EA3에서도 각각 15 mg m^{-2} , 18 mg m^{-2} 로 외양 정점인 EB7(1 mg m^{-2}) 보다는 상대적으로 높게 나타났다. 반면 cyanobacteria의 지

시 색소인 zeaxanthin은 연안역 정점인 EE1, EB1, TEA1 등에서 매우 낮은 값(1 mg m^{-2} 이하)을 보였으며 외양역 정점인 EB8(6 mg m^{-2})과 EA10(9 mg m^{-2})에서 상당히

높게 나타났다(Table 1).

식물플랑크톤 군집의 지시자로 사용되는 주요 색소의 분포 양상은 영양염의 분포 양상과 연관성이 높은 것으로 나타났다. 수심 50 m까지 적분한 질산염 농도는 연안 용승역에서 335 mg m^{-2} (EE1)로 가장 높게 나타나고 D3에서 206 mg m^{-2} 로 나타났으며, 외양역인 EB4에서는 74 mg m^{-2} 로 급격하게 감소하였다. 이와 유사하게 용승역 정점에서 diatoms의 주요색소인 fucoxanthin의 농도가 가장 높게 나타났으며(90 mg m^{-2}), 외양역 정점으로 갈수록 D2(41 mg m^{-2}), EB4(2 mg m^{-2}) 급격하게 감소하는 양상을 보였다. 울릉난수성 소용돌이가 나타난 EB8에서는 상대적으로 높은 수온과 질산염 농도(37 mg m^{-2})가 매우 낮게 나타났다(Fig. 7, 9). Cyanobacteria는 고수온($>10^{\circ}\text{C}$)과 낮은 N:P 비, 질산염이 고갈된 환경을 선호하는 것으로 보고되고 있으며(Odate et al. 1990; Le Bouteiller et al. 1992), 울릉분지에서 나타난 울릉난수성 소용돌이에서 cyanobacteria의 주요색소인 zeaxanthin의 증가는 낮은 질산염 농도와 높은 수온과 연관이 있는 것으로 판단된다.

식물플랑크톤 군집구조

울릉분지에서 정점 별로 적분한 식물플랑크톤의 주요 색소 농도를 기초로 Mackey et al. (1996)에 의해서 개발된 CHEMTAX 프로그램을 이용하여 엽록소-*a*로 대표되는 식물 플랑크톤의 생체량에 대한 각 식물플랑크톤 군집의 상대적인 기여도를 분석하였다(Fig. 11). 대부분의 정점에서 diatoms이 평균 40%로 우점하였으며, 연안 정점들에서(EE1, D2, EC1, TEA1) 50% 이상을 차지하여 높은 기여도를 보였다. 특히 연안 용승이 일어나는 정점 EE1과 D2에서 diatoms이 식물플랑크톤 생체량의 각각 87%와 64%를 차지하였다(Fig. 11). 북한한류의 영향을 받

는 정점들인 TEA1와 EA3에서도 diatoms이 우점하는 군집으로 나타났다. 외양역에 위치한 정점인 EA10과 EB8에서는 빈 영양 해역에서 높은 생산성을 보이는 cyanobacteria가 식물플랑크톤 생체량의 각각 70%와 38%를 차지하였다. 반면 연안역에 위치한 정점들에서는 cyanobacteria의 기여도는 10% 이하로 낮은 기여도를 보였다. 그 밖에 prasinophytes, dinoflagellates, pelagophytes, prymnesiophytes 등은 대부분의 정점에서 10% 이내의 기여도를 보였다.

연안역에서 엽록소-*a*에 대한 diatoms의 높은 기여도는 남쪽연안과 북쪽연안에서 각각 영양염의 농도가 높은 아표층수와 북한한류의 유입으로 인해서 영양염이 풍부한 환경이 형성되면서 diatoms이 성장하기에 유리한 환경 조건이 형성된 것으로 판단된다. 반면 연안에서 외양으로 갈수록 유광층 내의 영양염은 공급원의 감소와 식물플랑크톤에 의한 소모로 인하여 영양염의 농도는 감소하고 이에 따라 diatoms의 기여도가 감소하고 크기가 작은 식물플랑크톤(pico-와 nano- 크기)의 기여도가 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 울릉분지에서 나타나는 용승, 소용돌이와 같은 현상들은 유광층 내의 영양염 환경의 변화를 초래하고 이러한 환경 변화는 식물플랑크톤 생체량과 군집구조에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

동물플랑크톤의 분포 양상

2008년 8월의 시료에서 각 분류군에 따라 동정의 계급(category) 수준이 중으로 모두 일치하지는 않지만, 총 8분류군 67속 116종의 동물플랑크톤이 채집되었으며, 그 중 주요각류가 전체 출현량의 50.8%가 출현하여 가장 우점하는 것으로 나타났다(Fig. 12). 동해 동물플랑크톤의 출현 및 분포에 대한 연구는 세 번 보고되었으며, 본 연구에서 동

Fig. 11. Relative contribution of each phytoplankton class to chlorophyll *a* calculated using the CHEMTAX program in the Ulleung Basin, East Sea.

Fig. 12. Relative abundance of the 10 dominant zooplankton in the East Sea during August 2008.

물플랑크톤의 출현종수가 116종으로 나타났다. 이런 출현종수는 Park and Choi (1997)의 111종과 비슷하였고, Park et al. (1991)의 67종보다는 훨씬 더 많다. 이러한 연구들 사이에서 나타나는 출현종수의 차이는 아마도 채집에 사용된 장비나 시공간적인 채집의 빈도 그리고 채집 년도의 차이에 따른 환경 변화 등이 차이일 것으로 보인다.

각 정점에서 출현하는 동물플랑크톤 종수는 최소 22종에서 최대 61종이었고, 수심 150 m 이내의 연안정점에서는 평균 28종이 출현하였으며, 수심 1000 m 이상의 외양에서는 평균 37종이 출현하였다(Fig. 13a). 울릉분지 남동해역에서 동물플랑크톤의 출현량은 $55\sim 916 \text{ ind. m}^{-3}$ 의 범위를 보였고, 수심 150 m 이내의 연안에서 평균 409 ind. m^{-3} 으로 수심 1000 m 이상의 외양의 241 ind. m^{-3} 보다 많았다(Fig. 13b). 특히 이러한 연안과 외양의 뚜렷한 출현량 차이는 하계 울릉분지 남서 연안해역에서 우점하는 *Calanus sinicus*, *Paracalanus parvus* s. l., *Evadne tergestina*의 상대적인 기여도차이 때문인 것으로 여겨진다. 이들의 전체 동물플랑크톤에 대한 기여도는 대한해협과 연안지역에서는 약 68.0%였고 외양에서는 14.0%였다. 동물플랑크톤의 서식에 영향을 주는 요인들은 크게 수온, 염분, 먹이와 같은 환경요인에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

*C. sinicus*는 주로 온대 연안역에 출현하며 광온 및 광염성을 지닌 종으로 잘 알려져 있다(Chen and Zhang 1965; Huang and Zheng 1986; Huang et al. 1993; Hulsemann 1994). 특히, 각 해역에 따라 수온에 대한 내성 범위가 서로 다른 것으로 보고되고 있다(Uye et al. 1990; 서와 서 1993). 본 조사기간 중의 수온은 $0\sim 22^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보였는데, 이 등 (2006)의 연구에서도 *C. sinicus*가

Fig. 13. (a) Species richness and (b) abundance of zooplankton in the East Sea during August 2008.

$2\sim 24^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 출현하였고, $14\sim 21^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 최대를 보였다. *P. parvus* s. l.은 우리나라 연안에서 연중 지속적으로 출현하며, 온대 연안종으로 잘 알려져 있다(황과 최 1993; Peterson et al. 2002). *P. parvus* s. l.은 서와 서 (1993)에 의해 광양만에서 수온이 높은

Fig. 14. Abundance and relative abundance of the dominant zooplankton in each area of the East Sea during August 2008.

(>27°C) 8월에 내만을 중심으로 대량 번식하는 것으로 알려져 있는데, 본 조사기간 중의 연안 수온이 이보다 낮아 이들의 출현보다는 *C. sinicus*가 더 우점하여 출현한 것으로 보인다.

또한 몇몇 정점에서는 지각류 *E. tergestina*가 요각류보다 많은 출현하였다. 이 종은 주로 연안에서 식물플랑크톤과 매우 작은 입자를 섭식하고, 수온과 먹이 생물의 분포에 따라서 분포가 결정된다(Conover 1978; Ramirez and Perez 1985). 특히 부영양화 된 내만에서 처녀생식(parthenogenesis)을 통하여 짧은 시기에 폭발적으로 개체군의 크기가 증가하는 것으로 알려져 있다(Longhurst and Seibert 1972; Onbe 1977; Kim et al. 1993).

하계 울릉분지에 우점하는 동물플랑크톤의 출현량은 연안지역과 외해지역에서 뚜렷한 차이가 있는데, 이는 먹이량의 차이와 관련이 있는 것으로 보인다. 수심 50 m까지 적분된 질산염+아질산염과 엽록소-*a*의 양을 보면 연안지역에 주로 질산염+아질산염의 양이 많고 외해에는 적게 나타났다(Fig. 9). 그리고 식물플랑크톤 생체량도 영양염이 풍부한 연안지역에서 높게 나타났다. 따라서 연안지역에서 풍부한 영양염을 이용하여 SCM층에서 식물플랑크톤의 성장이 동물플랑크톤에 필요한 먹이를 공급하는 것으로 사료된다.

본 연구에서 물리, 화학적인 수괴의 성격을 고려하여 연구 기간 동안 울릉분지 해역에 북한한류의 영향을 받는 지역과 울릉난수성 소용돌이 그리고 용승이 일어나는 3개의 특징적인 수괴가 나타남이 확인되었다(Fig. 8). 북한한류의 영향을 받는 정점 TEA1, TEA3에서 정점 TEA1은 요각류 *Neocalanus plumchrus*(21%), 요각류 *Oithona plumifera*(12.8%), 요각류 *Metridia pacifica*(10.5%), 지각류 *Evadne spinifera*(7.5%), 요각류 *C. sinicus*(6.3%), 모악

류 *Sagitta elegans*(5.8%)가 우점하여 나타났으며, TEA3은 요각류 *M. pacifica*(18.2%), 지각류 *E. spinifera*(9.6%), 요각류 *N. plumchrus*와 단각류 *Themisto japonica*(8.2%), 요각류 *Scolecithricella minor*(7.8%), Ostracoda(7.5%), 요각류 *C. sinicus*(6.6%), 모악류 *S. elegans*(5.9%), 요각류 *O. plumifera*(5.6%)가 우점하여 나타났다(Fig. 14).

*N. plumchrus*은 주로 수온이 2~18°C에서 출현하고 *M. pacifica*는 5~15°C에서 출현하는 것으로 알려져 있다. 그리고 *S. minor*는 16°C 이하의 수온에서 출현하는 것으로 알려져 있으며, *S. elegans*는 영하 15~21°C에서도 출현하며, 1~12°C의 온도범위에서 출현하는 것으로 알려져 있다(Kobari and Ikeda 2001, Liu and Hopcroft 2006; Morioka 1976; Sameoto 1966). 이러한 종들이 우점하여 나타나는 것은 이 해역이 북한한류의 영향을 받는 해역임을 단적으로 보여주고 있다. 그러나 이러한 한류성 동물플랑크톤은 이 해역에 식물플랑크톤의 생체량이 높음에도 불구하고 출현량이 적었다(Fig. 13). 이 해역은 수온이 한류성과 난류성의 경계부분에 위치해 있어서 울릉분지에서 높은 출현량을 보인 온대 연안종인 *P. parvus* s. l. 출현량이 감소하였으며, 한류종의 출현량이 상대적으로 적어 전체 동물플랑크톤의 출현량은 온대 연안종이 우점하는 다른 연안 지역보다는 낮은 것으로 생각된다.

본 연구에서 나타났던 울릉난수성 소용돌이의 중심 부근인 EB8에서는 지각류 *Penilia avirostris*(18.0%), 야광충 *Noctiluca scintillans*(15.6%), 모악류 *S. elegans*(13.4%), 살파류 *Thalia democratica*(6.8%), 요각류 *O. plumifera*(5.6%)가 우점하여 나타났으며, 소용돌이 가장자리인 EB6C에서는 살파류 *T. democratica*(17.8%), 요각류 *O. plumifera*(10.2%), 요각류 *Euchaeta plana*(6.7%), 야광충 *N. scintillans*(6.4%)가 우점하여 나타났다(Fig. 14). 반면

Fig. 15. Abundance and relative abundance of the dominant zooplankton at EB1, EB6C, and EB8 of the East Sea during August 2008.

연안인 EB1에서는 *C. sinicus*(21.3%), *Oikopleura* spp. (15.9%), *P. parvus* s. l.(12.3%), 곤쟁이류 유생(7.3%), *N. plumchrus*(7%), *E. pacifica*(5.4%) 순으로 나타났다.

동물플랑크톤의 출현종수는 EB1에서 38종, EB6C에서는 61종, EB8에서는 49종으로 나타나 연안에서는 출현종수가 낮게 나타났다. 출현량은 EB1에서 461 ind. m⁻³, EB6C에서 302 ind. m⁻³, EB8에서 251 ind. m⁻³로 나타나 연안보다는 외양이 그리고 울릉난수성 소용돌이 중심보다는 가장자리가 높게 나타났다. 또한 EB6C에서는 요각류의 출현비율이 49.0%로 나타난 반면, EB8에서는 요각류의 출현비율이 27.0%로 나타나 울릉난수성 소용돌이 중심과 가장자리는 종 조성 및 출현량에서 차이를 보였다 (Fig. 15).

소용돌이 중심인 EB8에서는 엽록소-*a*의 양이 연안에 비해 적었으며, diatoms이 우점한 연안에 비해 cyanobacteria가 상대적으로 많이 출현하였다. 일반적으로 요각류는 cyanobacteria를 먹이로써 선호하지 않기 때문에 소용돌이 중심에서의 요각류 출현 비율이 낮게 것으로 추정된다 (Lampert 1987; Ahlgren et al. 1990). 반면 cyanobacteria를 섭식하는 것으로 알려져 있는 지각류 *P. avirostris*가 소용돌이 중심인 EB8에서 우점하였다(Lipei et al. 1997).

일부 동물플랑크톤은 표층 해류 흐름과 밀접한 관계를 보였다(Fig. 16). 연안에서 서식하는 것으로 알려진 *E. tergestina*는 대한해협 정선 EE에서 출현비율이 높았으며 앞서 설명한 인공위성 추적부이의 경로를 따라 상대 출현비율이 높게 나타났다(Fig. 16). 이는 *E. tergestina*의 유영능력이 약하여 해류의 흐름에 대해 저항력이 약해 표층 해류의 흐름에 실려 이동한 것으로 추정된다(Gore 1980; Paffenhöfer and Orcutt 1986; Mullin and Onbe 1992).

Fig. 16. Relative abundance of *Evadne tergestina* in the East Sea during August 2008. Daily positions at 00h:00m of an Argos drifter drogued at 15 m depth between Aug. 5 and 29, 2008 are also shown.

4. 요약

여름철 동해 울릉분지 해역의 해수 물성과 생지화학적 특성, 식물 및 동물플랑크톤 군집 구조와 이들 상호간의 관계를 파악하기 위하여 대한해협으로부터 울릉도 북부해역에 이르는 해역에서 2008년 8월 6일부터 14일에 걸쳐 총 8개의 연안에 수직한 방향의 단면에서 국립해양조사원의 해양2000호를 이용하여 CTD를 이용한 물성관측, 인공위성 추적 부이를 통한 표층 해류 관측과 동시에 영양염, 엽록소, 식물플랑크톤 광합성 색소 및 동물플랑크톤에 관한 채집 등 물리, 화학, 생물 분야에 대한 다학제적인 관측이 이루어졌다.

CTD 관측 자료와 인공위성 추적부이 자료로부터 2008년 8월의 울릉분지의 상층순환은 37°30'N 북쪽에서 연안을 따라 EE 단면의 저층까지 남하하는 북한한류수, 울기, 감포해역에서 지속적인 남서풍과 지형적인 조건에 의한 연안용승, 대마난류 중층수와 더불어 대한해협을 통과한 후에 동해연안을 따라 북상한 후에 37°N 근처에서 외해로 향하였다가 일부는 시계방향으로 회전하는 울릉난수성 소용돌이의 영향으로 독도 남쪽에서 다시 남쪽으로

향하며 다른 일부는 북서향하는 대마난류 증층수와 함께 북서향하는 대마난류 표층수로 특징지어진다.

영양염의 분포는 이러한 물리적 환경 특성에 따라 구분되어 표층부터 수심 50 m까지 적분된 질산염+아질산염의 분포는 연안용승 지역과 북한한류수의 영향을 받는 36°N 이북의 연안에 높게 나타났고, 울릉난수성 소용돌이가 위치하는 지역에서는 낮게 나타났다.

식물플랑크톤의 주요 광합성 색소를 기초로 한 식물플랑크톤 군집구조에서도 역시 물리적인 환경 특성을 잘 반영하여 영양염이 풍부한 연안 용승 지역과 북한한류수의 영향을 받는 지역에는 diatoms이 우점하는 군집이 나타났으며, 영양염이 고갈된 울릉난수성 소용돌이 지역에서는 빈 영양 해역에서 높은 생산성을 보이는 cyanobacteria가 우점하였다. 울릉분지에서 나타나는 용승, 소용돌이와 같은 물리적 현상들은 유광층 내의 영양염 환경의 변화를 초래하고 이러한 환경 변화는 식물플랑크톤 생체량과 군집구조에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

동물플랑크톤의 출현 양상은 연안에서 외양으로 갈수록 출현량은 낮아지고 출현종수는 높아지는 경향이 나타났다. 식물플랑크톤의 생산량이 낮은 울릉난수성 소용돌이의 중심은 가장자리의 정점들에 비해서 낮은 동물플랑크톤 출현량을 보였다. 그러나 동물플랑크톤 채집이 용승 현상이 일어난 시기와 일치하지 않아 용승 현상과 동물플랑크톤의 직접적인 관련성은 파악하기 어려웠다. 유영능력이 약한 지각류 *E. tergestina*의 분포는 인공위성 추적 부이의 이동경로와 유사한 것으로 보아 해류를 따라 연안에서 울릉분지 내부로 이동하는 것으로 판단된다.

결론적으로 2008년 하계 동해 울릉 분지의 플랑크톤 군집의 지리분포는 동한난류, 울릉난수성 소용돌이, 그리고 연안용승으로 대표되는 물리·화학적 변인을 충실히 반영하고 있어서 이 세 가지 요인은 일시적 교란이라기 보다는 이 시기를 지배하는 변인-forcing으로서 장기적인 변동에 주목할 필요가 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행하고 있는 동해 해류 및 환경특성 연구(EAST-I)의 지원을 받아서 수행하였다. 현장 관측에서 많은 도움을 주신 국립해양조사원 관계자 여러분과 해양2000호 선장님 및 승조원 여러분들께 감사사를 드립니다.

참고문헌

공영, 박창길 (1969) 한국 동해냉수역의 해양학적 특성. 국립수산진흥원 연구보고서 4:69-91

- 김대현 (2008) 한국 남동해역의 해류 구조와 연안용승. 이학박사학위논문, 부경대학교, 72 p
- 김철호, 김구 (1983) 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. 한국해양학회지 18:73-83
- 박창길 (1978) 한국 동해안 냉수괴의 해양화학적 특성. 한국수산학회지 11:49-54
- 서호영, 서해립 (1993) 광양만의 부유성 요각류 출현량의 계절변동. 한국환경생물학회지 20:118-129
- 이동규 (1998) 감포 울기 연안해역에서 발생하는 냉수대 현상과 해상풍과의 관계. 한국수산학회지 31(3):359-371
- 이창래, 박철, 양성렬, 신용식 (2006) 아산만 해역 중형동물플랑크톤의 시공간적 변동. 한국해양학회지 바다 11:1-10
- 정창수, 심재형, 박용철, 박상갑 (1989) 한국 동해의 기초생산력과 질소계 영양염의 동적 관계. 한국해양학회지 24:52-61
- 황학진, 최중기 (1993) 황해 중동부 해역 동물플랑크톤의 계절적 분포 특성. 한국해양학회지 28:24-34
- Ahlgren G, Lundstedt L, Brett M, Forsberg C (1990) Lipid composition and food quality of some freshwater phytoplankton for cladoceran zooplankters. J Plankton Res 12:809-818
- Ahn H, Shim K, Shin HR (1994) On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea (the Japan Sea). J Korean Soc Oceanogr 29(2):152-163
- An HS (1974) On the cold water mass around the southeast coast of Korean Peninsula. J Oceanol Soc Korea 9:10-18
- Ashjian CJ, Davis CS, Scott M, Gallagher M, Alatalo P (2005) Characterization of the zooplankton community, size composition, and distribution in relation to hydrography in the Japan/East Sea. Deep-Sea Res II 52:1363-1392
- Byun SK (2000) Structure and source of low salinity water observed during May in the Cheju Strait. J Oceanol Soc Korea 35:107-108
- Byun SK, Seung YH (1984) Description of current structure and coastal upwelling in the southeast Japan Sea-summer 1981 and spring 1982. In: T. Ichiye (ed) Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea. Elsevier, pp 83-93
- Chang KI, Hogg N, Suk MS, Byun SK, Kim YG, Kim K (2002a) Mean flow and variability in the southwestern East Sea. Deep-Sea Res I 49:2261-2279
- Chang KI, Kim YB, Suk MS, Byun SK (2002b) Hydrography around Dokdo. Ocean and Polar Res 24:369-389
- Chang KI, Teague WJ, Lyu SJ, Perkins HT, Lee DK, Watts DR, Kim YB, Mitchell DA, Lee CM, Kim K (2004) Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review. Prog Oceanogr 61:105-156

- Chen Q, Zhang S (1965) The planktonic copepods of the Yellow Sea and the East China sea. I. Calanoida. *Studia Marina Sinica* 7:20-131 (in Chinese with English abstract)
- Chiba S, Hirota Y, Hasegawa S, Saino T (2005) North-south contrasts in decadal scale variations in lower trophic-level ecosystems in the Japan Sea. *Fish Oceanogr* 14:401-412
- Cho KD, Bang TJ, Shim TB, Yu HS (1990) Three dimensional structure of the Ulleung warm lens. *Bull Korean Fish Soc* 23:323-333
- Cho YK, Kim K (1994) Two modes of salinity-minimum layer water in the Ulleung Basin. *La Mer* 32:271-278
- Cho YK, Kim K (1998) Structure of the Korea Strait Bottom Cold Water and its seasonal variation in 1991. *Cont Shelf Res* 18:791-804
- Conover RJ (1978) Transformation of organic matter. In: *Marine Ecology. Vol. IV. Dynamics*. Kinne O (eds) John Wiley & Sons, New York, pp 221-499
- Gore MA (1980) Feeding experiments on *Penilia avirostris* Dana (Cladocera: Crustacea). *J Exp Mar Biol Ecol* 44:263-260
- Huang C, Uye S, Onbe T (1993) Geographic distribution, seasonal life cycle, biomass and production of a planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan and its neighboring Pacific Ocean. *J Plankton Res* 15:1229-1246
- Huang J, Zheng Z (1986) The effects of salinity on the distribution of some copepods in the Jiulongjiang estuary. *Acta Oceanol Sinica* 8:83-91 (in Chinese with English abstract)
- Hulsemann K (1994) *Calanus sinicus* Brodsky and *C. jashnovi*, nom. Nov. (Copepoda: Calanoida) of the North-west Pacific Ocean: a comparison, with notes on the integumental pore pattern in *Calanus* s. str. *Invert Tax* 8:1461-1482
- Hyun JH, Kim D, Shin CW, Noh JH, Yang EJ, Mok JS, Kim SH, Kim HC, Yoo S (2009) Enhanced phytoplankton and bacterioplankton production coupled to coastal upwelling and an anticyclonic eddy in the Ulleung Basin, East Sea. *Aquat Microbiol Ecol* 54:45-54
- Jeffrey SW (1997) Application of pigment methods to oceanography. In: Jeffrey SW, Mantoura RFC, Wright SW (eds) *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*, UNESCO Publishing, Paris
- Kang S, Kim S, Bae SW (2000) Changes in ecosystem components induced by climate variability off the eastern coast of the Korean Peninsula during 1960-1990. *Prog Oceanogr* 47:205-222
- Kang YS, Kim JY, Kim HG, Park JH (2002) Long-term changes in zooplankton and its relationship with squid, *Todarodes pacificus*, catch in Japan/East Sea. *Fish Oceanogr* 11:337-346
- Kim K, Chung JY (1984) On the salinity minimum layer and dissolved oxygen-maximum layer in the East Sea (Japan Sea). In: T. Ichiye (ed) *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier Science Publisher, pp 55-65
- Kim K, Kim KR, Chung JY, Yoo HS, Park SG (1991) Characteristics of physical properties in the Ulleung Basin. *J Oceanol Soc Korea* 26:83-100
- Kim K, Kim KR, Min DH, Volkov Y, Yoon JH, Takematsu M (2001) Warming and structural changes in the East(Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans? *Geophys Res Lett* 28(17):3293-3296
- Kim S, Kang SK (2000) Ecological variations and El Nino effects off the southern coast of the Korean Peninsula during the last three decades. *Fish Oceanogr* 9:239-247
- Kim SW, Onbe T, Yoo KI (1993) Distribution of the marine cladoceran *Evadne spinifera* in waters adjacent to Korean Peninsula. *J Kor Oceanogr* 28:47-51
- Kim TH, Lee YW, Kim G (2010) Hydrographically mediated patterns of photosynthetic pigments in the East/Japan Sea: Low N:P ratios and cyanobacterial dominance. *J Mar Sys* 82:72-29
- Kim YG, Kim K (1999) Intermediate waters in the East/Japan Sea. *J Oceanogr* 55:123-132
- Kobari T, Ikeda T (2001) Ontogenetic vertical migration and life cycles of *Neocalanus Plumchrus* (Crustacea:Copepoda) in the Oyashio Region with notes on regional variations in body sizes. *J Plankton Res* 23:287-302
- Lampert W (1987) Laboratory studies on zooplankton cyanobacterial interactions. *NZ J Mar Freshwater Res* 21:483-490
- Le Bouteiller A, Blanchot J, Rodier M (1992) Size distribution patterns of phytoplankton in the western Pacific: towards a generalization for the tropical open ocean. *Deep-Sea Res* 39:805-823
- Lee JC (1983) Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J Oceanol Soc Korea* 18:149-160
- Lee JC, Na JY (1985) Structure of upwelling of the southeast coast of Korea. *J Oceanol Soc Korea* 20:6-19
- Lipei LP, Turk MV, Malej A (1997) The trophic role of the marine cladoceran *Penilia avirostris* in the Gulf of Trieste. *Hydrobiologia* 360:197-203

- Liu H, Hopcroft R (2006) Growth and development of *Metridia pacifica* (Copepod: Calanoida) in the northern gulf of Alaska. *J Plankton Res* **28**:769-781
- Longhurst AR, Seibert DLR (1972) Oceanic distribution of *Evadne* in the eastern Pacific (Cladocera). *Crustaceana* **22**:239-248
- Mackey MD, Mackey DJ, Higgins HW, Wright SW (1996) CHEMTAX - a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. *Mar Ecol Prog Ser* **144**:265-283
- Mitchell DA, Watts DR, Wimbush M, Teague WJ, Tracey KL, Book JW, Chang KI, Suk MS, Yoon JH (2005) Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. *Deep-Sea Res II* **52**:1617-1638
- Morioka Y (1976) Vertical invasion of boreal calanoid copepods into the shallow warm stratum. *Bull Japan Sea Regional Fish Res Lab* **27**:91-101
- Mullin MM, Onbe T (1992) Diel reproduction and vertical distributions of the marine cladocerans, *Evadne tergestina* and *Penilia avirostris*, in contrasting coastal environments. *J Plankton Res* **14**:41-59
- Odate T, Yanada M, Castillo LV, Maita Y (1990) Distribution of cyanobacteria and other picophytoplankton in the western north Pacific ocean, summer 1989. *J Oceanol Soc Japan* **46**:184-189
- Onbe T (1977) The biology of marine cladocerans in warm temperature water. p. 383-393. In: *Proc. Symposium on Warm Water Zooplankton*. Publicacao Especial, UNESCO/National Institute of Oceanography, Goa
- Paffenhöfer GA, Orcutt JD Jr. (1986) Feeding, growth and food conversion of the marine cladoceran *Penilia avirostris*. *J Plankton Res* **8**:741-754
- Park C, Choi JK (1997) Zooplankton community in the front zone of the East Sea of Korea (the Sea of Japan): 1. Species list, distribution of dominant taxa and species association. *J Korean Fish Soc* **30**:225-238
- Park JS, Kang CK, An KH (1991) Community structure and spatial distribution of phytoplankton in the polar front region off the east coast of Korea in summer. *Bull Korean Fish Soc* **24**:237-247
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 173 p
- Peterson WT, Keister JE, Feinberg L (2002) The effects of the 1997-99 El Niña events on hydrography and zooplankton off the central Oregon coast. *Prog Oceanogr* **54**:381-398
- Pool HH, Atkins WRG (1929) Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year. *J Mar Biol Assoc United Kingdom* **16**:279-324
- Ramirez FC, Perez SGM (1985) New data on the ecology distribution of cladocerans and first local observations on reproduction of *Evadne nordmanni* and *Podon intermedius* (Crustacea, Cladocera) in Argentine Sea waters. *Phys A* **43**:131-143
- Sameoto DD (1966) Life history, ecological production, and empirical mathematical model of the population of *Sagitta elegans* in St. Margaret's Bay, Nova Scotia. *J Fish Res Board Canada* **28**:971-985
- Shim JH, Park JK (1996) Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea III. Vertical distribution of the phytoplankton in relation to chlorophyll maximum layer. *J Korean Soc Oceanogr* **31**:196-206
- Shim JH, Yeo HG, Park JK (1992) Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea I. Biomass and Productivity. *J Korean Soc Oceanogr* **27**:91-100
- Shin CW, Byun SK, Kim C, Seung YH (1998) Southward intrusion of the East Sea intermediate water into the Ulleung Basin: observations in 1992 and 1993. *J Korean Soc Oceanogr* **33**:146-156
- Shin HR, Shin CW, Kim C, Byun SK, Hwang SC (2005) Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the western East/Japan Sea. *Deep-Sea Res II* **52**:1742-1762
- Takikawa T, Yoon JH (2005) Volume transport through the Tsushima Straits estimated from sea level difference. *J Oceanogr* **61**:699-708
- Uye S, Huang C, Onbe T (1990) Ontogenetic diel vertical migration of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Inland Sea of Japan. *Mar Biol* **104**:389-396
- Wright SW, Jeffrey SW, Mantoura RFC, Llewellyn CA, Bjørnland T, Repeta D, Welschmeyer N (1991) Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Mar Ecol Prog Ser* **77**:183-196
- Yeber L, Harris RP, Head EJH, Yashayaev I, Harris LR, Hirst AG (2009) Mesoscale physical variability affects zooplankton production in the Labrador Sea. *Deep-Sea Res I* **56**:703-715
- Yoo S, Park J (2009) Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan? *J Mar Sys* **78**:301-315
- Yun JY, Magaard L, Kim K, Shin CW, Kim C, Byun SK (2004) Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait. *Prog Oceanogr* **60**:99-131

- Zapata M, Rodríguez F, Garrido JL (2000) Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C₈ column and pyridine-containing mobile phases. *Mar Ecol Prog Ser* **195**:29-45
- Zhang CI, Lee JB, Kim S, Oh JH (2000) Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystem and

fisheries resources in Korean waters. *Progr Oceanogr* **47**:171-190

Received Sep. 10, 2010

Revised Sep. 14, 2010

Accepted Sep. 17, 2010